基于三结太阳电池的透射率测量系统

赵慧洁 唐 吾 张 颖 张庆祥

(北京航空航天大学 精密光机电一体化教育部重点实验室 100191) (中国空间技术研究院 北京 100094)

摘 要: 在空间环境中太阳电池的涂层会发生退化,从而影响航天器的飞行寿命,因此研究能够测量涂层光学透射率变化的系统具有重要意义. 使用三结太阳电池作为探测器接收光能量;设计光电流检测电路,对太阳电池输出电流进行电流-电压变换,放大,滤波和模数转换,最终输入上位机处理;运用双通道比对测量技术,比较有玻璃和无玻璃的三结太阳电池光电流测量值,计算出玻璃样片在三结太阳电池响应谱段内的整体透射率;使用热电阻传感器检测太阳电池工作温度以消除温度变化带来的误差. 通过实验测得系统的测试相对误差约为0.1%,测量不确定度小于0.15%.

关 键 词: 透射率测量; 三结太阳电池; 比对测量

中图分类号: V 416.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0482-05

Transmittance measurement system based on triple-junction solar cells

Zhao Huijie Tang Wu Zhang Ying

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Qingxiang

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The degradation of solar cells' coatings in space environment will shorten space aircraft's fight life. So the research of the system which can measure the coatings transmittance's change is important. The transmittance measurement system was constructed by two triple-junction solar cells, one of which was covered with the glass sample and another was not. The triple-junction solar cells were used as detectors to measure solar flux. The photocurrent measurement circuits convert the photocurrent to analog volt, which will be multiplied and filtered. And the volt was translated to digital signal, which is transferred to the computer finally. The photocurrent signals of two triple-junction solar cells were acquired to calculate the overall transmittance in the solar cell responding spectrum, by using two channels comparing measurement method. The solar cells operation temperature was monitored by platinum-chip temperature sensors, in order to avoid measurement error which is induced by temperature change. The measurement relative error of system is about 0.1%, and the measurement uncertainty is less than 0.15%, which is proved by experiment.

Key words: transmittance measurement; triple-junction solar cells; comparing measurement

太阳电池作为新能源的产生装置,其技术在近年来飞速发展. 传统的硅光电池之后,多结太阳电池、薄膜太阳电池等技术相继出现,使得电池的光电转换效率大幅提高,更加具有实用价值. 同时,与太阳电池配套的,具有良好光学性能、热控性能、防静电性能、甚至抗辐射性能的防护涂层的

收稿日期: 2010-12-09; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:19

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0919.017.html

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0705)

作者简介: 赵慧洁(1966 -),女,辽宁沈阳人,教授,hjzhao@buaa.edu.cn.

技术也得到发展[1-3]. 涂层的光学透射性是评价其优劣的主要标准. 传统的测量方法是使用分光光度计测量覆有涂层的标准玻璃样片的光谱透射率[4]. 然而对于适用于太阳电池的玻璃样片,测量其在太阳电池响应谱段内透射过的总太阳能量更加重要,因此,开发能够测量覆有涂层的玻璃样片的整体透射率的系统具有重要意义. 本文给出一种新颖的基于三结太阳电池的测量系统设计,通过比较测量法可以直接测出覆有涂层的玻璃样片在太阳电池响应谱段内的整体透射率,并给出系统的标定精度.

1　测量原理

透明介质的光谱透射率为

$$\tau(\lambda)=\phi_\tau(\lambda)/\phi(\lambda) \tag{1}$$

式中,$\phi_\tau(\lambda)$为从透明介质透出的某微小波段内的光通量;$\phi(\lambda)$为入射到介质的对应波段内的光通量. 为了更好的评价应用于太阳电池的覆有涂层的玻璃样片的光学性能,使用"整体透射率"[5]这一模型,表达式为

$$T_{cg}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}[\tau_c(\lambda)\tau_g(\lambda)R(\lambda)I(\lambda)]\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}[R(\lambda)I(\lambda)]\mathrm{d}\lambda} \tag{2}$$

式中,$\tau_c(\lambda)$为涂层的光谱透射率;$\tau_g(\lambda)$为玻璃的光谱透射率;$R(\lambda)$为太阳电池的光谱响应率;$I(\lambda)$为太阳辐照谱,通常 $I(\lambda)$采用 AM0(Air Mass Zero)标准太阳辐照谱;λ_1 与 λ_2 为太阳电池响应范围的两个端点值,对于三结太阳电池,λ_1 与 λ_2 的典型值取 0.3 μm 和 1.8 μm.

实际上在测量整体透射率时,用光电探测器件上产生的光电流来反映入射到其光敏面的光通量. 将待测试样插入测量仪器的测量光路前后,由该测量仪器探测器上产生的两次光电流之比作为试样的透射比[6]. 由于这种测试方法无法保证插入试样前后光源强度的一致性,测试误差较大. 为了克服这个问题,本测量系统采用双通道比对测试法,如图 1 所示. 覆有待测涂层的玻璃样片和三结太阳电池组成测量通道;相同的三结太阳电池作为参考探测器. 由于测量通道和参考通道的组成部分仅相差覆有待测涂层的玻璃样片,所以通过比较两个通道的输出数据可以计算出它的整体透射率.

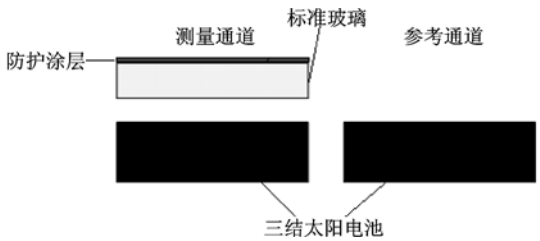


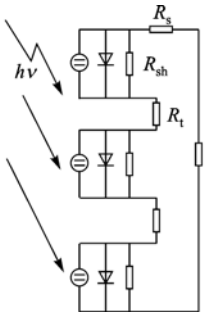
图 1　双通道比对测试法原理结构图

2　测量系统设计

该测量系统以三结太阳电池作为探测器,比对测量双通道输出的光电流,最后计算出待测样品的整体透射率. 下面对三结太阳电池、光电流及温度检测电路进行介绍.

2.1　三结太阳电池

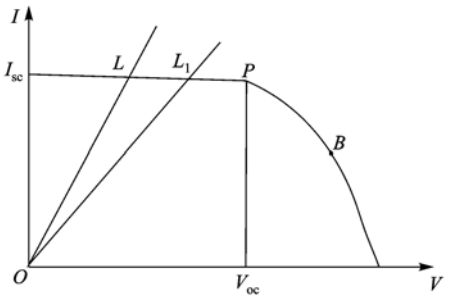
三结太阳电池具有很高的转换效率,目前国产的 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池在 AM0 光谱下的转换效率可达 26%. GaInP/GaInAs/Ge 两端三结太阳电池中的 3 个 p-n 结形成 3 个子电池:顶电池(top cell)、中间电池(middle cell)和底电池(bottom cell). 它们串联成为三结太阳电池,其等效电路如图 2 所示.



$h\nu$—一个光子能量;R_s—串联电阻;
R_{sh}—并联电阻;R_t—隧穿电阻[7].

图 2　三结太阳电池等效电路图

三结太阳电池的输出特性与硅光电池类似,如图 3. 将曲线分为 3 个区域[8]:I_{SC}到 P 点为一个区域,可将这段区域称为太阳电池的恒流区;P 到 B 点为电流变化的最大功率区;过了 B 点后电流开始急剧下降,将此称为急速下降区. 当太阳电池的负载阻值曲线 L 或 L_1 与太阳电池的输出特性



I_{SC}-太阳电池的短路电流;V_{OC}-太阳电池的开路电压.

图 3　三结太阳电池 *V-I* 特性曲线与负载特性曲线

相交于恒流区时,电池输出电流接近于 I_{SC},与入射光通量有良好的线性关系.

探测器的噪声特性是评价其性能的一个重要参数,因此对三结太阳电池的噪声进行理论估算.

2.1.1 热噪声

热噪声是由耗散元件中电荷载流子的无规则热运动引起的,任何有电阻的材料都有热噪声. 由于载流子的均方速度与热力学温度成正比,噪声电流随温度增高而增加,因此称为热噪声.

热噪声电流常用均方值表示. 在纯电阻情况下,表达式为

$$I_{nT}=\left(\frac{4kT\Delta f}{R}\right)^{1/2} \tag{3}$$

式中,R 为所讨论元件的电阻值;k 为玻尔兹曼常数;T 为电阻所处环境的热力学温度;Δf 为所用测量系统的频带宽度.

取三结太阳电池 R_s 的值为 0.025 Ω 并代入式(3)计算. 在 $T=300$ K 下,$\Delta f=1$ Hz 的带宽内的均方根热噪声电流的值约为 4.70×10^{-8} mA.

2.1.2 散粒噪声

光电探测器的散粒噪声表现为光生载流子的涨落. 散粒噪声的电流均方值为

$$I_{ns}=(2qI_{dc}\Delta f)^{1/2} \tag{4}$$

式中,q 为电子电荷;I_{dc} 为光电流的直流分量. 取尺寸为 3 cm × 4 cm 的三结太阳电池的 I_{SC} = 200 mA代入式(4),在单位带宽下,计算得到散粒噪声的电流均方值为 2.53×10^{-7} mA.

通过计算热噪声电流和散粒噪声电流的平方和根,可得出三结太阳电池的输出噪声电流谱为 $i_s=2.57\times10^{-7}$ mA/$\sqrt{\text{Hz}}$.

2.2 检测电路

温度变化将会导致太阳电池响应率发生变化,为了保证测量精度,每次进行测试时的温度应相同. 因此,检测电路完成两个基本功能:双通道太阳电池直流信号检测和温度检测. 其功能模块如图 4 所示.

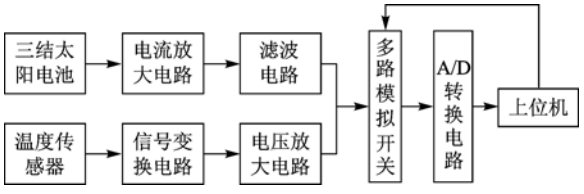


图 4 检测电路功能模块图

2.2.1 光电流检测模块

由于在 AM0 辐照下三结太阳电池输出电流较大,达到了约 200 mA,因此先采用电流-电压转换电路,将光电流变换成电压后再输入运算放大电路. 如前所述,转换电路的阻值应该足够小,使太阳电池的输出电流接近于短路电流,从而与光通量有良好的线性关系. 经放大后的电压经过 RC 滤波器简单滤波,然后输入模数转换电路. 前置放大及滤波电路图 5 所示.

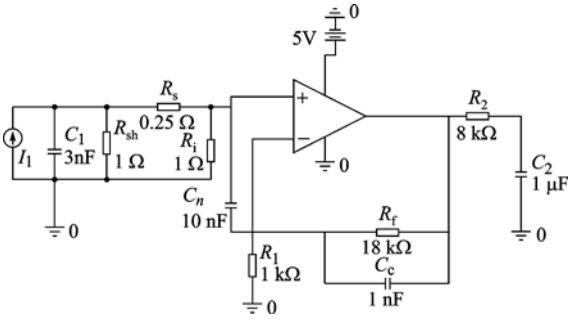


图 5 前置放大及滤波电路的功能原理图

前置放大电路输出的信噪比决定了整个电路输出信号质量的好坏,对仪器的精度有重要的影响. 输入前置放大器的噪声主要由 2 部分组成:①太阳电池输出信号附带的噪声,这在 2.1 节中已经分析过;②运算放大器及其反馈电路产生的噪声. 分析了前置电路的各个噪声源以及电路的噪声带宽后,计算出各噪声分量在输出端的值如表 1 所示. 计算时,噪声增益为 19,RC 滤波器带宽为 20 Hz,T 取 300 K. 从表 1 中可知,对放大电路影响最大的噪声源是运放的输入电压噪声以及 R_1 的热噪声,因此,在芯片选型及确定电路参数时要重点注意这两部分.

表 1 前置放大器的输出噪声

噪声源	输出端噪声分量的平方/V^2
运算放大器输入电压噪声	2.07×10^{-12}
运算放大器反相输入电流噪声在 R_f 上产生的电压噪声	1.62×10^{-19}
运算放大器正相输入电流噪声在源电阻 R_i 上产生的电压噪声	1.81×10^{-25}
R_f 的热噪声	5.96×10^{-15}
R_1 的热噪声	1.07×10^{-13}
太阳电池的输出噪声	4.77×10^{-16}

前置放大电路输出的电压将进入 ADC 进行模数变换,根据系统的精度要求,选择低噪声的 12 位 4 通道 AD7991. 精密电压基准 ADR444 为 AD7991 提供 4.096 V 的基准电压. 前置放大电路的输出噪声级别为 10^{-3} mV,远小于 ADC 的 1LSB (Least Significant Bit). 所以分析检测电路输出端的精度时,主要考虑 AD7991 的参数指标. 经分析计算,AD7991 输出端的精度为 0.2209%. AD7991 依次转换温度信号、测量通道光电流信号及参考通道光电流信号,并将数字信号输入总线转换芯片 CH341T. CH341T 将 IIC 总线信号转换成 USB

总线信号,并输入上位 PC 机进行处理.

2.2.2　温度检测模块

采用热电阻作为传感器检测太阳电池的工作温度. 热电阻数据采集通常采用电桥电路,其电路结构简单,但其输出存在较大的非线性误差. 为了消除传统电桥电路的非线性误差,提高测试精度,设计了恒流源电路来弥补传统热电阻数据采集电路的缺点,电路原理图如图 6 所示.

电路采用 ADC 的精密电压源作为参考源,即参考电压 R_{EFV} 为 4.096 V. 参考输入电压输入运放 LMV341,采用精密电阻 R_4,R_5,R_6,Pt100 构成测量电桥,其中 R_4 和 R_5 阻值相同,均为误差为 0.1% 的精密电阻,R_6 为精密电位器 RPotSM. 根据运算放大器的机理运放的反相输入端电压也为 R_{EFV},则桥电路的左边部分由 R_4 和 Pt100 构成了恒流源电路,经过运算得得到线性调理后的计算值为

$$V_1 - V_2 = \frac{R_{EFV}}{R_5 + R_6}\Delta R_t \tag{5}$$

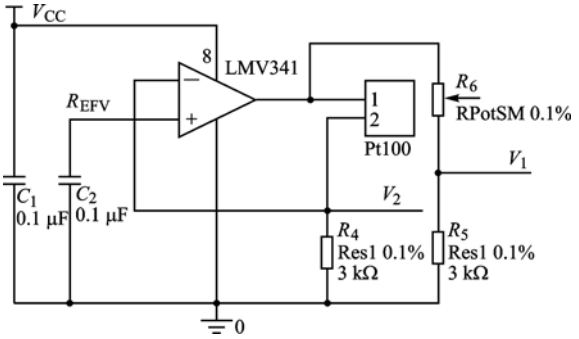


图 6　*Pt*100 桥式电路

其中 ΔR_t 为热电阻的温度变化. 以摄氏零度为参考点,设置参考精密电阻为 100 Ω. 当 Pt100 的电阻值和参考电位器 R_6 的电阻值不相等时,电桥输出一个毫伏级的压差信号,这个压差信号经过后端差分放大电路后输出期望的电压信号,再经模数转换后送至 PC 机进行处理.

3　实验及结果

利用光谱透射率基本与波长无关的中性密度滤光片作为标准参考件,对透射率测量系统的精度进行评价. 先使用单色仪 spectroPro 2500i 和相机 Pixis 1024 标定中性密度滤光片的光谱透射率,计算得到在 400-1 100 nm(滤光片的标准透过率光谱范围)的光谱范围内其平均透射率约为 93.5%. 将中性滤光片固定在测量通道的一个圆孔内,参考通道的圆孔空置,用积分球均匀照亮系统的通光圆孔,则两个通道输出的比值为整体透射率的测量值. 测量系统的实物如图 7 示,实验设置如图 8 所示.

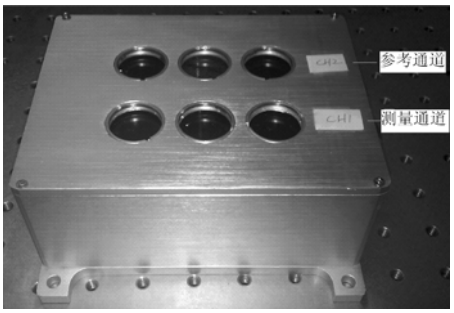


图 7　测量系统实物图

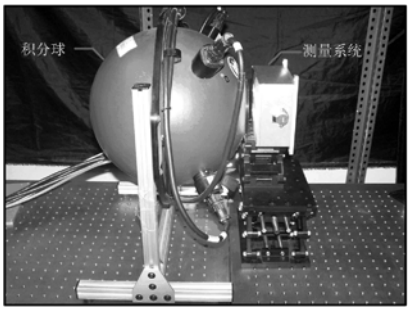


图 8　实验设置图

将测量 N 次的结果取平均值后与标定值比较,可以评价系统的测量准确度. 测量相对误差可以表示为

$$\Delta T = \frac{\left| T - \left(\sum_{j=1}^{N} T_{cj} \right) \Big/ N \right|}{T} \tag{6}$$

式中,T 为中性密度滤光片的透射率标定值;T_{cj} 为针对此滤光片的一组系统测量值.

系统测量的相对不确定度表示为

$$\frac{u(T)}{T} = \frac{1}{T}\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}(T_{cj} - T)^2} \tag{7}$$

在实验中,改变积分球的光强,使其输出辐照度从 240 W/m^2 变化至 1376 W/m^2. 每改变一次光强都应该重复一遍测量过程,以评价在不同光源强度下系统的测量精度. 应用系统测量中性密度滤光片的结果以及精度分析如表 2 所示.

表 2　系统测量结果及精度分析

光源辐照度/(W·m^2)	透射率平均值	相对误差/%	相对不确定度/%
240	0.9383	0.353	0.633
595	0.9336	0.150	0.289
1 100	0.9356	0.064	0.246
1 353	0.9340	0.107	0.150
1 376	0.9345	0.053	0.118

从表 2 的结果可以看出,在弱光条件下(240 W/m^2)系统的测量结果无论是从准确性和精确性来说都比较差. 因此在使用系统进行透射率测量时,光源的辐照度控制在 1 000 ~ 1 376 W/

m^2 内将保证测量结果具有较高的精度.

由于此透射率测量系统仍然处于实验室原理样机阶段,工作环境温度基本稳定.由于实验室条件所限,未进行温度变化下的试验,样机在变温环境下的工作情况还有待研究.

4 结束语

本文设计了基于三结太阳电池的透射率测量系统,给出了系统的基本测量原理以及硬件设计方案.该系统利用比对测试法实现了样片在太阳电池响应谱段内的整体透射率测量,克服了传统透射率测试过程中插入样片前后光源强度变化的问题.经实验证明:在 1 376 W/m^2 的光源辐照度下,系统的测试相对误差小于0.1%,测量不确定度小于0.15% .该系统结构紧凑,使用方便,在玻璃样片的透射率测量领域有一定的应用价值.

参考文献(References)

[1] Buie D, McCann M J, Weber K J, et al. Full day simulations of anti-reflection coatings for flat plate silicon photovoltaics[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2004, 81: 13 - 24

[2] Brandhorst H, Smith T I, Lichtenhan J D. POSS coating as replacements for solar cell cover glasses[C]// 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 26 - 29

[3] Wells B, Brandhorst H, Lichtenhan J, et al. Radiation tolerant POSS solar cell cover glass replacement material[C]// 5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). St Louis, Missouri: AIAA, 2007: 25 - 27

[4] GB/T 2680 - 94 建筑玻璃可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定[S]
GB/T 2680 - 94 Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance for glass in building and related glazing factors[S] (in Chinese)

[5] Lee A L. Effects of contamination on solar cell cover glass[C]// AIAA Materials Specialist Conference. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992: 29 - 34

[6] 毕卫红,张保军,张宇,等.一种新颖的镀膜玻璃可见光透射比测量方法[J].光电工程,2008,35(4):53 - 57
Bi Weihong, Zhang Baojun, Zhang Yu, et al. Novel measurement of coated glass visible light transmittance[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(4): 53 ~ 57 (in Chinese)

[7] 张献逢.多结太阳能电池光谱响应测试系统中光学系统研究[D].天津:河北工业大学测控技术与仪器系,2007
Zhang Xianfeng. Research of optical system in spectral response measurements of multi-junction solar cells[D]. Tianjin: Measurement & Control Technology and Instrument, Hebei University of Technology, 2007 (in Chinese)

[8] 李景天,刘祖明,廖华,等.太阳电池光谱响应测试中负载电阻的选择[J].太阳能学报,2004,25(3):350 - 352
Li Jingtian, Liu Zuming, Liao Hua, et al. Load resistance selection in spectral response test of solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(3): 350 - 352 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)

(上接第 481 页)

4 结束语

本文针对三轴一体光纤陀螺提出了一种各项分离测试的高精度标定方法,有效消除了标定过程中地球转速分量的影响和各参数之间的相互影响,提高了标定精度,同时简化了标定计算过程.将此方法实际应用于某高精度光纤捷联系统,给出了标定结果和系统测试结果,验证了此方法的正确性和工程实用性.

参考文献(References)

[1] 张炎华,王立端,战兴群,等.惯性导航技术的新进展及发展趋势[J].中国造船,2008,49(183):134 - 144
Zhang Yanhua, Wang Liduan, Zhan Xingqun, et al. The new advancement and trend of inertial navigation technology[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(183): 134 - 144 (in Chinese)

[2] 王新龙,马闪.光纤陀螺温度与标度因数非线性建模与补偿[J].北京航空航天大学学报,2009,35(1):28 - 31
Wang Xinlong, Ma Shan. Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 28 - 31 (in Chinese)

[3] GJB 2426A-2004 光纤陀螺仪测试方法[S]
GJB 2426A-2004 Test methods for fiber optic gyroscope[S] (in Chinese)

[4] Bar-Itzhack I Y, Harman R R. Implicit and explicit spacecraft gyro calibration[R]. AIAA-2004-5343, 2004

[5] 陈雪芹,耿云海.一种利用星敏感器对陀螺进行在轨标定的算法[J].系统工程与电子技术,2005,27(12):2112 - 2116
Chen Xueqin, Geng Yunhai. On-orbit calibration algorithm with star sensors of gyros[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(12): 2112 - 2116 (in Chinese)

[6] 贾大玲,李连仲,严卫钢.基于星敏感器的弹载陀螺工具误差分离研究[J].计算机仿真,2006,23(2): 40 - 43
Jia Daling, Li Lianzhong, Yan Weigang. Missile borne gyroscope error separation based on star-sensor[J]. Computer Simulation, 2006, 23(2): 40 - 43 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)